

## ステッピングモータの基本

ステッピングモータは、電気パルス信号を機械的に断続するステップ動作に変換する電気・機械変換装置です。電気的な指令パルス信号が適切な順序で与えられると、モータ軸は断続的なステップ増加分に応じて回転します。モータ回転と与えられた入力パルスとの間には、いくつか直接的な関係があります。与えられたパルスの順序はモータ軸の回転方向、モータ軸の回転速度は入力パルスの周波数、モータ軸の回転角度は与えられた入力パルスの数とそれぞれ直接関係しています。

### ステッピングモータの長所と短所

#### 長所

1. モータの回転角度は、入力パルスに比例する。
2. 静止状態でトルクが最大になる（巻線に通電している場合）。
3. 良いステッピングモータは、ステップ角毎の誤差は $\pm 3 \sim 5\%$ の精度を持ち、この誤差はステップ間で累積しないため、高精度な位置決めと動作の反復性を持つ。
4. 始動/停止/逆転に対する優れたレスポンスを有する。
5. モータ内に接触ブラシがないため、非常に信頼性が高い。このため、モータの寿命は軸受けの寿命にのみ依存する。
6. モータはオープンループ制御が可能なデジタル入力パルスに応答することから、モータ制御がより容易かつ低コストになる。
7. 軸と直接連結された負荷とは、超低速な同期運転が可能になる。
8. 回転速度は入力パルスの周波数に比例するため、広範囲の回転速度を実現できる。

#### 短所

1. 制御が不適切な場合、共振が発生することがある。
2. 超高速での運転は容易でない。

### オープンループ動作

ステッピングモータの最も重要な長所の1つとして、オープンループで正確に制御可能である点が挙げられます。この場合のオープンループ制御とは、位置に関してフィードバックする情報が必要ないことを意味します。この制御方法により、光エンコーダなど高価な検出装置やフィードバック装置は必要なくなります。また、入力ステップパルスの状況を把握するだけで、位置を知ることが可能です。

### ステッピングモータの種類

ステッピングモータには、3つの基本形があります。

- ・可変リラクタンス型（VR）
- ・永久磁石型（PM）
- ・ハイブリッド型（HB）

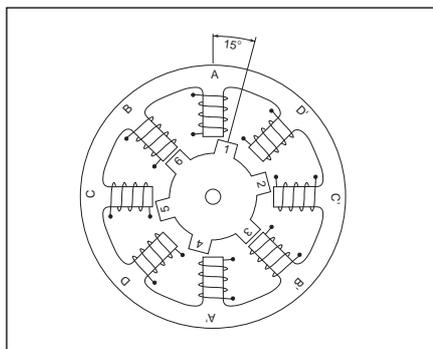


図1 可変リラクタンス（VR）型ステッピングモータの断面図

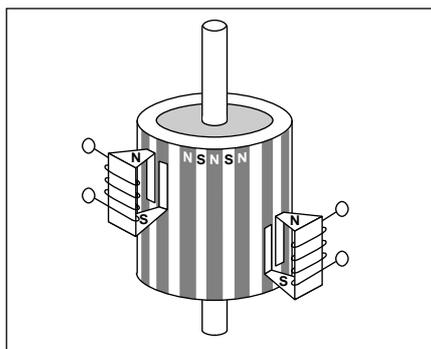


図2 永久磁石（PM）型ステッピングモータの原理

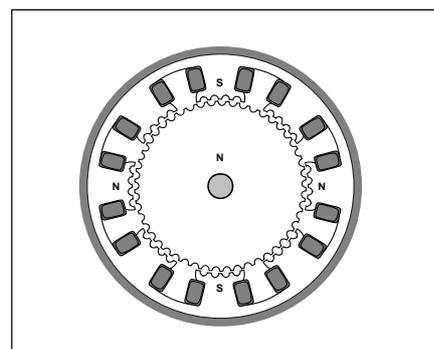


図3 ハイブリッドステッピングモータ（HB）型の断面図

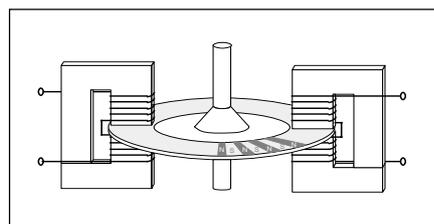


図4 ディスクマグネットモータの原理図

## 可変リラクタンス型 (VR)

可変リラクタンス (VR) 型はかなり以前から使用されています。構造的な視点から理解するのがわかりやすいでしょう。図 1 に、典型的な VR 型ステッピングモータの断面図を示します。このモータは、複数の歯を持つ電磁軟鉄製の回転子 (ロータ) と、巻線等から成る固定子 (ステータ) で構成されています。固定子の巻線に直流電流が流れると磁極が励磁され、回転子の歯が固定子極に引き寄せられることによって回転します。

## 永久磁石型 (PM)

永久磁石 (PM) 型は低コスト、低分解能のモータであり、代表的なステップ角度は 7.5 度から 15 度です (48 ~ 24 ステップ / 回転)。PM 型モータは、その名前が示すように、モータ構造に永久磁石があります。回転子には VR モータのような歯はありません。代わりに回転子は、回転子軸に平行な直線上に交互に並べられた S 極と N 極によって磁化されています。これら磁化された回転子極によって磁束強度が増大されているため、PM 型モータは VR 型と比較してトルク特性が向上しています。

## ハイブリッド (HB)

ハイブリッド (HB) 型モータは、PM 型よりも高価ですが、ステップ分解能、トルク、および速度に関してより優れた性能を持っています。HB 型の代表的なステップ角度は 3.6 ~ 0.9 度です (100 ~ 400 ステップ / 回転)。HB 型は、PM 型と VR 型の両方の優れた点が組み合わされています。回転子は VR 型のように複数の歯を持ち、軸の周りに軸方向に同心状に磁化された磁石があります。回転子の歯によってより優れた磁気経路が得られ、磁束は空隙 (ギャップ) の指定された位置に導かれます。VR 型や PM 型と比較して、モータの残留、保持および動的トルク特性の幅が広がっています。

一般に使用されるステッピングモータは、PM 型と HB 型の 2 つです。システム設計時に、用途要件に適した種類の選択に迷う場合は、まず PM 型を評価してみるとよいでしょう。通常、PM 型の価格は HB 型の数分の一で、PM 型が要件に適していない場合は、HB 型を選択するとよいでしょう。

特殊なステッピングモータがいくつかあります。その 1 つに、Portescap が開発したディスクマグネットモータがあります。これは図 4 のように、ロータが希土類磁石のディスクとして設計されています。この型のモータは、慣性が非常に低く、2 つの固定子巻線間の結合なしで磁束経路が最適化されるなど、いくつかの長所があります。この型は、一部の用途で不可欠です。

## サイズと出力

ステップ角度による分類の他に、ステッピングモータはフレームサイズによっても分類されます。フレームサイズは、モータ本体の直径に対応します。たとえば、サイズ 11 のステッピングモータ本体の直径は約 1.1 インチです。同様に、サイズ 23 のステッピングモータ本体の直径は 2.3 インチ (58 mm) です。ただし本体の長さは、同じフレームサイズの区分内でもモータによって異なります。一般に、特定のフレームサイズのモータから得られるトルク出力は、本体の長さが増加するに従って増大します。

IC で駆動されるステッピングモータの電力レベルの範囲は、1 ワット未満の小型モータから、10 ~ 20 ワットの大型モータまで存在します。モータの最大消費電力や熱限界点は、モータメーカーのデータシートには明確に記載されていないことが多く見受けられます。これを見極めるには、 $P = V \times I$  という関係式を使用する必要があります。たとえば、サイズ 23 のモータの定格が 6 V で 1 A / 相であるとします。したがって、2 つの相を通電するモータでは、定格電力損失は 12 ワットとなります。一般に、ステッピングモータの定格損失は、モータケースの温度が無風状態で周囲温度より 65 °C 以上上昇する消費電力レベルとなります。したがって、モータをヒートシンクに取り付けられる場合は、許容消費電力を増大できる可能性があります。モータは最大消費電力で使用されるように設計されているため、サイズ / 出力電力 / コストを効率化するために、このことは重要です。

## ステッピングモータの用途

ステッピングモータは、動作制御が必要な場合に適しています。回転角度、速度、位置、および同期を制御する必要がある用途で効果的に使用できます。前述した長所により、ステッピングモータはプリンタ、プロッタ、ハイエンドのオフィス機器、ハードディスク、ファックスなど、多様な用途があります。

## 回転磁界

ステッピングモータの相巻線に電流が流れると、固定子に磁束が発生します。この磁束の方向は、以下のような、いわゆる「右手の法則 (右ネジの法則)」によって決定されます。

「巻線の電流の方向に指先を向けて右手でコイルをつかんだ場合 (親指はその他の指と 90 度の方向に伸ばします)、親指は磁束の方向を指します。」

図 5 に、B 相に図で示された方向の巻線電流が流れるとき発生する磁束の経路を示します。回転子は、磁束の抵抗が最小となる位置まで移動します。この場合、モータは S 極が位置 2 において固定子 B の N 極と一致し、N 極が位置 6 において固定子 B の S 極と一致するように、時計回りに移動します。モータを回転させるには、磁気の吸引力に回転子が従うような回転磁界が発生するように、固定子の巻線に連続的に通電する必要があります。

## トルク発生

ステッピングモータが発生させるトルクは、いくつかの要素に依存しています

- ・パルス速度（ステップレート）
- ・巻線の励磁電流
- ・ドライブ回路と形式

ステッピングモータでは、回転子と固定子の磁束が互いにずれるとき、トルクが発生します。固定子は透磁率の高い磁性材料でできています。透磁率が高い材料を使用することで、電子回路の導体のみ電流が流れるのと同様に、固定子の構造によって定義される経路に磁束の大部分が集まります。これによって、磁束は固定子両極に集中されます。モータによって生み出されるトルク出力は、巻線が励磁されたときに発生する磁束の強さに比例します。磁束の強さを定義する基本関係式は、次のように定義されます。

$$H = (N \times i) / l$$

ここで

H：磁束の強さ

N：巻線の巻数

i：巻線電流

l：磁束経路の長さ

この関係は、磁束の強さおよびそれによるトルクが巻線の巻数および電流に比例し、磁束経路の長さに反比例することを示しています。この基本関係から、同じフレームサイズのステッピングモータでも、巻線パラメータを変化させるだけでトルク出力性能が大きく変わることがわかります。巻線パラメータの、モータの出力性能に対する影響の詳細については、「ドライブ回路の基本」の章を参照してください。

## 相、磁極、およびステップ角

ステッピングモータは2相のものが多いですが、3相または5相のモータも存在します。ここでは主に2相ステッピングモータについて説明します。バイポーラモータには相あたり1本の巻線、ユニポーラモータには中間タップを持った、相あたり1本の巻線を有します。2相しか持たないユニポーラモータが「4相モータ」と称されることもあります。

相あたり2本の独立した巻線をもつモータも存在します。このようなモータは、バイポーラモードでもユニポーラモードでも駆動できます。

磁極は、磁化した物体のなかで、磁束が集中する一部の領域として定義できます。磁極はステッピングモータの回転子と固定子の両方に存在します。図5は、固定子の各相に2つの磁極（または磁極1対）と、回転子に2つの磁極（磁極1対）をもつ2相ステッピングモータの概略図です。実際には、モータの1回転あたりのステップ数を増加させるために、すなわち基本（フルステップ時の）ステップ角を小さくするために、回転子と固定子の両方に適当な数の磁極を追加します。PM型には、回転子と固定子の磁極対が同じ数だけ含まれます。一般に、PM型モータには12の磁極対があります。固定子には、相当たり12の磁極対があります。HB型モータには、歯をもつ回転子があります。回転子は永久磁石によって2つに分割され、歯の半分がS極に、もう半分がN極になります。磁極対の数は、回転子の片方にある歯の数と同じになります。HB型モータの固定子には巻線のある主磁極よりもっと多くの等価的な極（磁極ピッチはより小さく、等価磁極の数 =  $360 / \text{歯ピッチ}$ ）があります。通常、ステップ角  $3.6^\circ$  のHB型には4つの主磁極、 $1.8^\circ$ タイプおよび  $0.9^\circ$ 度タイプには8つの主磁極が使用されます。回転子磁極および同等の固定子磁極の数と、ステッピングモータのフルステップ角度を決定する相数との関係は、次のようになります。

$$\text{ステップ角} = 360 / (N_{PH} \times P_H) = 360 / N$$

$N_{PH}$ ：相あたりの等価磁極数

$P_H$ ：相数

N：全ての相にある総磁極数

回転子と固定子の歯ピッチが等しくない場合は、さらに複雑な関係が存在します。

## 駆動ステップモード

一般的な駆動モードには次のものがあります。

- ・ウェーブドライブ（直接波形駆動）（1相励磁）
- ・フルステップ駆動（2相励磁）
- ・ハーフステップ駆動（1 - 2相励磁）
- ・マイクロステップ駆動（モータ電流を連続的に変化させる）

図6を参照してください。

ウェーブドライブ / 1相励磁では、ある時間内で巻線が1本だけ励磁されます。固定子は、A B / A / B（「 / A」はAの反転論理を示す）というシーケンスに従って励磁され、回転子は位置 8 2 4 6と移動します。同じ巻線パラメータをもつユニポーラおよびバイポーラ巻線モータでは、この励磁モードでは機械的位置は同じになります。この駆動モードの短所は、定められた時間内にユニポーラモータでは総モータ巻線の25%のみ、バイポーラモータでは50%のみしか使用できないことです。このことは、モータから最大出力トルクを得られていないことを意味します。

フルステップ駆動 / 2相励磁では、任意の時間に2つの相を励磁します。固定子は、A・B / A・B / A・ / B A・ / B Aというシーケンスに従って励磁され、回転子は1 3 5 7と移動します。2相励磁では、1相励磁と同じ角移動量になりますが、機械的位置は1相励磁の1 / 2だけオフセットが加えられます。ユニポーラ巻線モータのトルク出力は、バイポーラモータよりも低くなります（同じ巻線パラメータのモータの場合）。これは、バイポーラモータが巻線全体を使用するのに対して、ユニポーラモータは使用可能な巻線の50%だけしか使用しないためです。

ハーフステップ駆動 / 1 - 2相励磁は、1相励磁と2相励磁を組み合わせたものです。2番目のステップごとに、1つの相のみが励磁され、その他のステップでは各固定子の1フェーズが励磁されます。固定子は、A・B B / A・B / A / A・ / B / B A・ / B Aというシーケンスに従って励磁され、回転子は1 2 3 4 5 6 7 8と移動します。この結果、角移動量は1相励磁または2相励磁の半分になります。1 - 2相励磁によって、1相励磁または2相励磁で見られる共振現象が低減されます。

上記のドライブモードの励起シーケンスは、表1に要約されています。

マイクロステップ駆動では、巻線の電流は連続的に変化するため、1つのステップを多くの小さな別々のステップに分割できます。マイクロステップの詳細については、「マイクロステップ」の章を参照してください。

## トルク対角度の特性

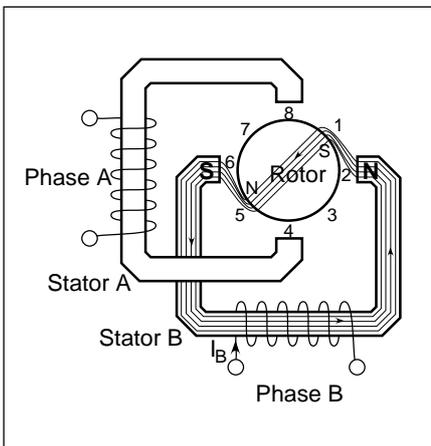


図5 回転子と固定子との間に遅れのある、2極ステッピングモータを通る磁束経路

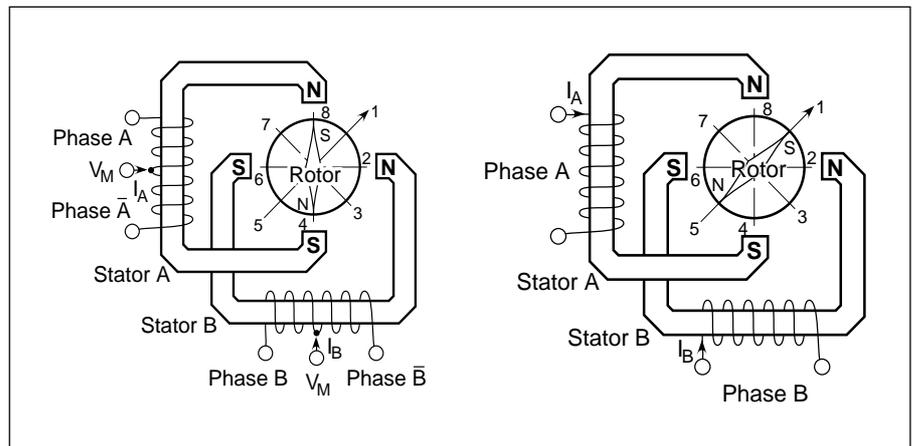


図6 ユニポーラおよびバイポーラ巻線ステッピングモータ

ステッピングモータのトルク対角度の特性は、回転子の変位とモータが定格電圧で励磁されたときに回転子軸に加わるトルクとの関係です。角度変位対トルク特性とも呼ばれます。理想ステッピングモータでは、図7で示すように、正弦波のトルク変位特性をもちます。

位置AとCは、回転子軸に外力や負荷が加えられていないときの安定した平衡点を表しています。モータ軸に外力 $T_A$ を加えると、角変位 $\theta_A$ が発生します。この角変位 $\theta_A$ は、モータがアクティブに加速しているか、減速しているかによって、進み角（リード角）または遅れ角（ラグ角）と呼ばれます。回転子が負荷を加えられて停止するとき、回転子はこの変位角で決まる位置で停止します。モータは、負荷とのバランスを得るため、加えられた外力に対してトルク $T_A$ を発生します。負荷が増大するにつれ、モータの最大ホールディングトルク $T_H$ に達するまで変位角も増大します。 $T_H$ を超過すると、モータは不安定な領域に入ります。この領域では、反対方向のトルクが発生するため、回転子は不安定な点を飛び越えて次の安定した点まで移動します。変位角は、次の関係式で決定されます。

$$X = (Z / (2 \cdot \omega)) \times \sin(T_A / T_H)$$

ここで

$X$  : 角度変位

$Z$  : 回転子の歯ピッチ

$\omega$  : 円周率

$T_A$  : 負荷トルク

$T_H$  : モータの定格ホールディングトルク

したがって、負荷がかかったモータの停止状態でのステップ角誤差に問題がある場合は、モータの「剛性」を変化させることで改善できます。これは、ブモータのホールディングトルクを増大させることで行えます。図8にこの効果を示します。一定の負荷に対してホールディングトルクを増大させると、ラグ角が $\theta_2$ から $\theta_1$ にシフトします。

### ステップ角の精度

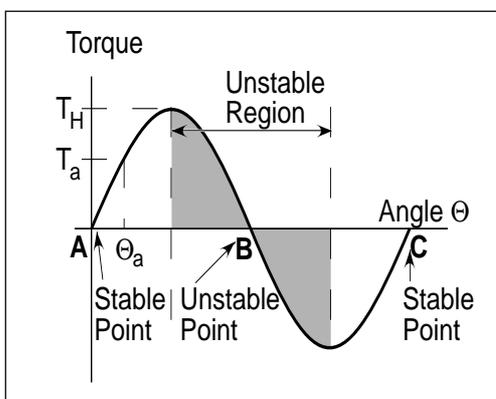


図7 トルク対回転子角度位置

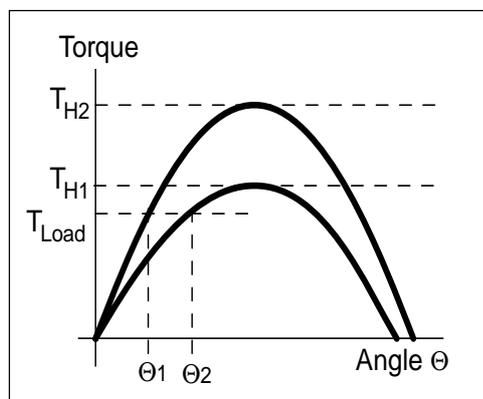


図8 異なる保持トルクでのトルク対回転子角度位置

位相	波形ドライブ				通常のフルステップ				ハーフステップ・ドライブ								
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	8	
A	•				•			•	•							•	•
B		•				•				•							
A			•				•				•						
B				•				•				•				•	•

表1 異なるドライブモードでの励起シーケンス

ステッピングモータが位置決めデバイスとして普及した理由のひとつに、精度と位置再現性があります。一般にステッピングモータのステップ角度精度は、1ステップの3～5%です。誤差はステップ間で累積されません。ステッピングモータの精度は、主に部品や組立の、機械的精度と関係があります。図9にステッピングモータの位置精度の典型的な例を示します。

### ステップ位置の誤差（ステップ角度誤差）

モータが前の保持位置から1ステップ移動したときの正または負の最大位置誤差は、次のようになります。

$$(\text{ステップ位置の誤差}) = (\text{実測ステップ角}) - (\text{理論ステップ角})$$

### 位置の誤差（静止角度誤差）

モータが初期位置からN回（ $N = 360^\circ / \text{ステップ角}$ ）ステップさせ、初期位置からの角度は各ステップ位置ごとに測定します。初期位置からNステップ後の角度を  $N$ 、誤差を  $N$  とすると、次のようになります。

$$N = N - (\text{ステップ角}) \cdot N$$

位置の誤差、すなわち静止角度誤差は、上記  $N$  の最大値と最小値の差ですが、通常  $\pm$  符号を使用して次のように表されます。

$$(\text{位置の誤差}) = \pm (1/2) \cdot (N_{\text{Max}} - N_{\text{Min}})$$

### 位置の誤差のヒステリシス（静止角度誤差ヒステリシス）

両方向で測定した静止角度誤差の差です。

### 機械的パラメータ、負荷、摩擦、慣性

ステッピングモータシステム（ドライバとモータ）の性能は、負荷の機械的パラメータにも大きく依存します。負荷はモータが動かすものとして定義されます。負荷は通常、摩擦、慣性、またはその組合せになります。

摩擦とは、互いにこすれる表面の凹凸による運動への抵抗です。摩擦は速度が一定の場合は一定です。摩擦にうち勝つために、ステップ速度全域にわたって（少なくとも摩擦力と等しい）最小限のトルクが必要です。摩擦負荷が増大すると、最大速度と加速度が低下し、位置の誤差が増大します。摩擦負荷が低減すると、その反対になります。慣性とは速度変化に対する抵抗です。高い慣性負荷の場合は、高い慣性始動トルクが必要になり、また、ブレーキの場合にもこれは当てはまります。慣性負荷が増大すると、速度の安定性と所定の速度に達するために必要な時間が増大し、最大自起動周波数が低下します。慣性が低減した場合はその反対になります。

回転子の振動は、摩擦および慣性負荷の量によって変動します。この関係により、機械的減衰によって回転子の不要振動を低減させることができます。しかしこれらの不要振動は、フルステップからハーフステップへの切り替えなど、電気的なダンピング制御方法によって低減させるほうが簡単です。

### トルク対速度の特性

トルク対速度の特性は、特定の用途に対して適切なモータと駆動方法を選択するときの鍵になります。これらの特性は、モータ、励磁モード、およびドライバまたは駆動方法の形式に依存します。図10は、典型的な「速度-トルク曲線」を示しています。

この曲線をより深く理解するためには、この曲線を別の側面から定義すると役立つでしょう。

### ホールディングトルク（保持トルク、静止最大トルク）

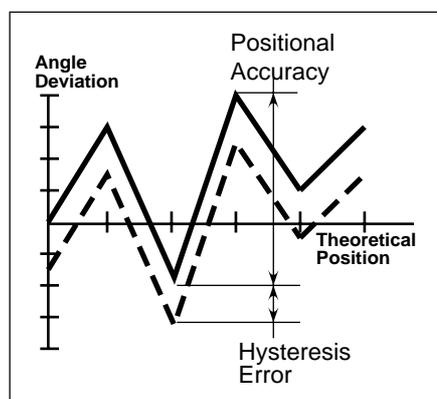


図9 ステッピングモータの位置精度

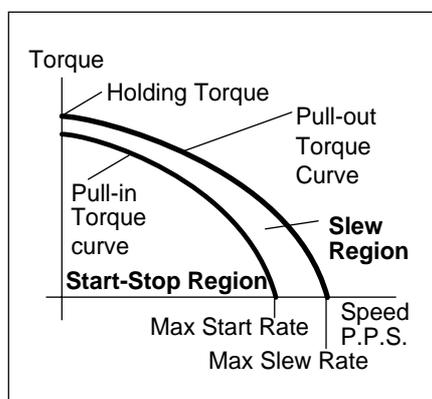


図10 ステッピングモータのトルク対速度特性

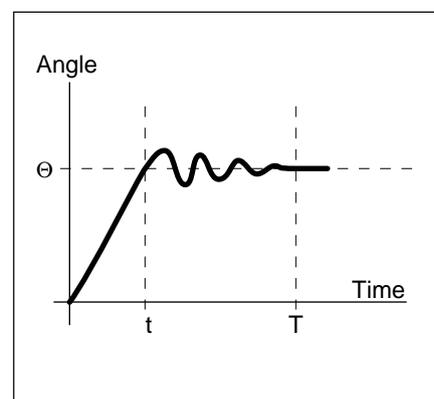


図11 シングルステップレスポンス対時間

停止状態でモータによって生み出される最大トルクです。

### ブルイントルク（引き込みトルク、起動トルク）

ブルイントルクは、「スタートストップ領域（自起動領域）」と呼ばれる領域を定義します。これは、負荷を加えた状態で、同期を失わずにモータが瞬時に起動や停止できる最大周波数です。

### 最大自起動周波数

負荷を加えない状態での最大始動ステップ周波数です。

### ブルアウトトルク（脱出トルク）

ブルアウトトルクは、「スルー領域（同期運転領域）」と呼ばれる領域を定義します。この曲線は、同期を失わずにモータが動作できる最大周波数を定義します。この領域は自起動領域の外側にあるため、モータは必ずこの領域には加速または減速されて入ります。

### 最大スルーレート（最大スルーイング周波数）

負荷を加えない状態でのモータの最大動作周波数です。

ブルイン特性は、負荷によっても変動します。負荷慣性が大きくなると、自起動領域が小さくなります。曲線の形状から、ステップパルス速度がモータのトルク出力性能に影響を与えることがわかります。速度が増加するにつれトルク出力が減少する理由は、高速ではモータのインダクタンスが支配的になるためです。

速度 - トルク曲線の形状は、使用するドライバのタイプによって劇的に変化します。新日本無線で提供するタイプのハイブリッドチョップドライバでは、モータの速度 - トルク性能が最大になります。ほとんどのモータメーカーは、モータの速度 - トルク曲線を提供しています。モータのトルク対速度特性は使用するドライブ方法によって非常に変動するため、モータメーカーが曲線を作成するときに使用したドライバの形式とドライブ方法を理解しておくことが重要です。

### ステップ応答と共振

図 1 1 に、ステップモータの 1 ステップ応答特性を示します。モータにステップパルスが 1 つ加えられると、回転子は上記の曲線で定義されたように動作します。ステップ時間  $t_s$  は、最初のステップパルスが加えられたとき、モータ軸が 1 ステップ角だけ回転するのにかかる時間です。この時間はトルク対慣性（負荷）の比率、および使用するドライバのタイプに大きく依存します。

トルクは変位の関数であるため、加速度もまた変位の関数になります。したがって、大きなステップ増分で移動するとき、高いトルクが発生し、その結果として高い加速度が生み出されます。この加速度によって、オーバーシュートやリングが発生することがあります。整定時間  $T$  は、このような振動やリングがなくなるのにかかる時間です。実使用ではこの現象は好ましくありません。このような現象は、ステップモータをマイクロステップさせることで低減または除去することができます。マイクロステップの詳細については、「マイクロステップ」の章を参照してください。

ステップモータでは、特定のステップ速度で共振現象が発生することがあります。共振は、ある特定の速度での急激なトルクの損失または低下として現れます。これによって、ステップが欠けたり（ミスステップ）、同期が失われたりすることがあります。共振は、入力ステップパルス速度が回転子の固有振動周波数と一致する場合に発生します。多くの場合、100 ~ 200 pps 領域付近に 1 カ所、および高いステップパルス速度領域に 1 カ所共振する領域があります。ステップモータの共振現象は、ステップモータの基本的構造から発生するため、完全に取り除くことは不可能です。また、共振は負荷の条件にも依存します。共振も、モータをハーフステップモードまたはマイクロステップモードで駆動することで低減できます。